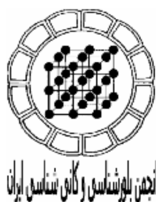
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران
سال بیست و ششم، شمارهٔ اول، بهار ۹۷، از صفحهٔ ۳۱ تا ۴۶



بررسی کانی‌سازی طلا ± مس منطقه جلمبادان (شمال غربی سبزوار) برپایه شواهد کانی-شناختی پهنه‌های دگرسانی و کانی‌سازی و زمین‌شیمی

پونه اشبک[۱]، آزاده ملکزاده شفارودی[*۲]، محمدحسن کریم‌پور[۲]

۱ - گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران
۲- گروه پژوهشی اکتشاف ذخایر معدنی شرق ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت مقاله: ۹۵/۱۱/۱۸، نسخه نهایی: ۹۶/۳/۴)

چکیده: رخداد کانی‌سازی جلمبادان در شمال غربی سبزوار، استان خراسان رضوی، و در جنوب غربی کمان ماگمایی قوچان- سبزوار قرار دارد. زمین‌شناسی منطقه شامل سنگ‌های آتشفشانی آندزیتی- تراکی آندزیتی ائوسن است که مورد نفوذ توده‌های نفوذی نیمه عمیق مونزودیوریتی تا دیوریتی قرار گرفته‌اند. کانی‌سازی به شکل افشان در همه توده‌های نفوذی و سنگ‌های آتشفشانی اطراف آنها دیده می‌شود. پیریت مهمترین کانی اولیه و مالاکیت، هماتیت، گوتیت و لیمونیت کانی‌های ثانویه هستند. دگرسانی گسترده‌ای در منطقه دیده می‌شود که کانی‌شناسی آن شامل کوارتز، سرسیت، کائولینیت، کلریت، اپیدوت و کلسیت است. ناهنجاری طلا بین ۰/۰۱۸ تا بیش از ۲ گرم در تن و مس تا ۵۰۹ گرم در تن بویژه در نیمه شرقی منطقه است. توده‌های نفوذی مونزودیوریتی تا دیوریتی نقش اصلی را در کانی‌سازی داشته‌اند. بافت این توده‌ها پورفیری است و پلاژیوکلاز، پیروکسن و هورنبلند کانیهای معمول آنها هستند. براساس شواهد زمین‌شیمیایی، این توده‌ها از نوع آهکی-قلیایی و گرانیتوئیدهای I هستند که در یک پهنه فرورانش حاشیه قاره از ذوب بخشی ۷ تا ۱۵ درصدی اسپینل لرزولیت تشکیل شده‌اند. برپایه جایگاه زمین‌ساختی، شواهد زمین‌شناسی، نوع و گسترش دگرسانی و کانی‌سازی و ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی، رخداد کانی‌سازی جلمبادان یک طلا± مس پورفیری است.

واژه‌های کلیدی: *دگرسانی؛ طلا± مس پورفیری؛ گرانیتوئید نوع I؛ پهنه فرورانش؛ کمان ماگمایی قوچان- سبزوار.*

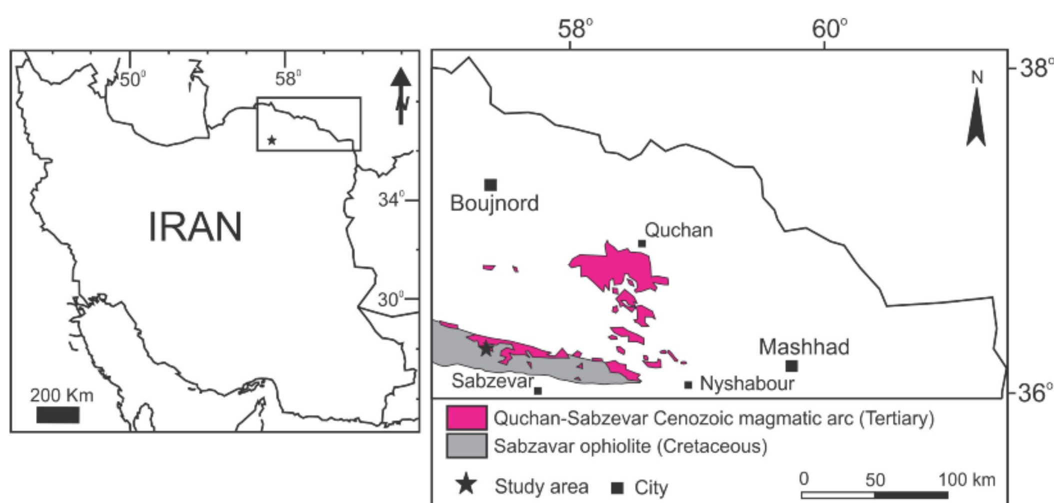
مقدمه

کمان ماگمایی قوچان- سبزوار در شمال شرقی ایران یکی از کمربندهای مهم فلززایی ایران برای فلزات مس، آهن، طلا و عناصر خاکی‌نادر محسوب می‌شود که کمتر مورد توجه قرار گرفته و بخشی زیادی از پتانسیل‌های معدنی آن ناشناخته مانده است. این کمان ماگمایی با روند شمال غربی- جنوب شرقی در افیولیت سبزوار و اطراف آن نفوذ کرده است و به سمت شمال تا کوه‌های البرز ادامه دارد [۱]. تشکیل این کمان مربوط به فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس سبزوار به زیر صفحه توران است [۲، ۳]. وجود تعداد زیادی شاخص آهن و مس همراه با کانسارهای شناخته شده‌ای مانند معدن مس- طلا- اورانیوم- عناصر خاکی نادر سبک نوع مس- طلا همراه با اکسید آهن (IOCG) معدن فیروزه نیشابور [۴]، مگنتیت± مس شترسنگ [۵] و مگنتیت- آپاتیت نوع کایرونای خانلق [۶، ۷] نشان‌دهنده پتانسیل بالای این کمان ماگمایی برای کانی-سازی‌های مختلف است.

منطقه اکتشافی جلمبادان در ۳۲ کیلومتری شمال غربی سبزوار در استان خراسان رضوی، در فاصله طول‌های جغرافیایی ۳۵″ ۲۳′ ۵۷° تا ۳۰″ ۲۴′ ۵۷° و عرض‌های جغرافیایی ۰۵″ ۲۷′ ۳۶° تا ۴۰″ ۲۷′ ۳۶° و در جنوب غربی روستایی به همین نام قرار دارد. براساس تقسیمات ساختاری، این منطقه در پهنه سبزوار و جنوب غربی کمربند آتشفشانی- نفوذی سنوزوئیک قوچان- سبزوار در نزدیکی افیولیت‌ها واقع شده است (شکل۱).

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۱۳۸۸۰۵۴۸۸، پست الکترونیکی: shafaroudi@um.ac.ir

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]



شکل۱ موقعیت منطقه جلمبادان در شمال شرقی ایران و کمان ماگمایی قوچان- سبزوار.

فاتحی [۸] زمین‌شناسی، کانی‌سازی و زمین‌شیمی غرب منطقه مورد بررسی در این پژوهش (خارج از چهارگوش مطالعه شده این مقاله) را در منطقه‌ای به وسعت یک کیلومترمربع و با همین نام بررسی کرده است. محدوده مورد بررسی هم اکنون متعلق به شرکت رادین معدن ایرانیان است که بررسی‌های اکتشافی و زمین‌شیمیایی گسترده‌ای انجام داده است که از آن جمله می‌توان به تهیه نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۵۰۰۰ و ۱:۱۰۰۰، برداشت و تجزیه ۶۵ نمونه رسوب رودخانه‌ای، حفر ۲۶ ترانشه و برداشت و تجزیه ۱۸۲ نمونه خرده‌سنگی از محل ترانشه‌ها برای بررسی عنصر طلا به روش عیارسنجی گرمایی و حدود ۲۶ نمونه برای بررسی سایر عناصر به روش طیف‌سنجی گسیل نوری پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) در شرکت زرآزما اشاره کرد [۹].

هدف از این پژوهش تصحیح نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰ با تاکید ویژه بر تفکیک توده‌های نفوذی و بررسی ارتباط آنها با کانی‌سازی و ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی منطقه، تهیه نقشه دگرسانی و کانی‌سازی، تفسیر داده‌های زمین-شیمیایی موجود با توجه به دگرسانی و کانی‌سازی، بررسی زمین‌شیمی و خاستگاه توده‌های نفوذی منطقه و در نهایت تعیین مدل کانی‌سازی در منطقه اکتشافی جلمبادان است. بی-شک این بررسی‌های، گام مهمی در راستای اکتشاف ذخایر معدنی مهم و جدید در کمان ماگمایی قوچان- سبزوار خواهد بود که ادامه آن منجر به شناخت بیشتر این ایالت فلززایی در شمال شرقی ایران است.

زمین‌شناسی

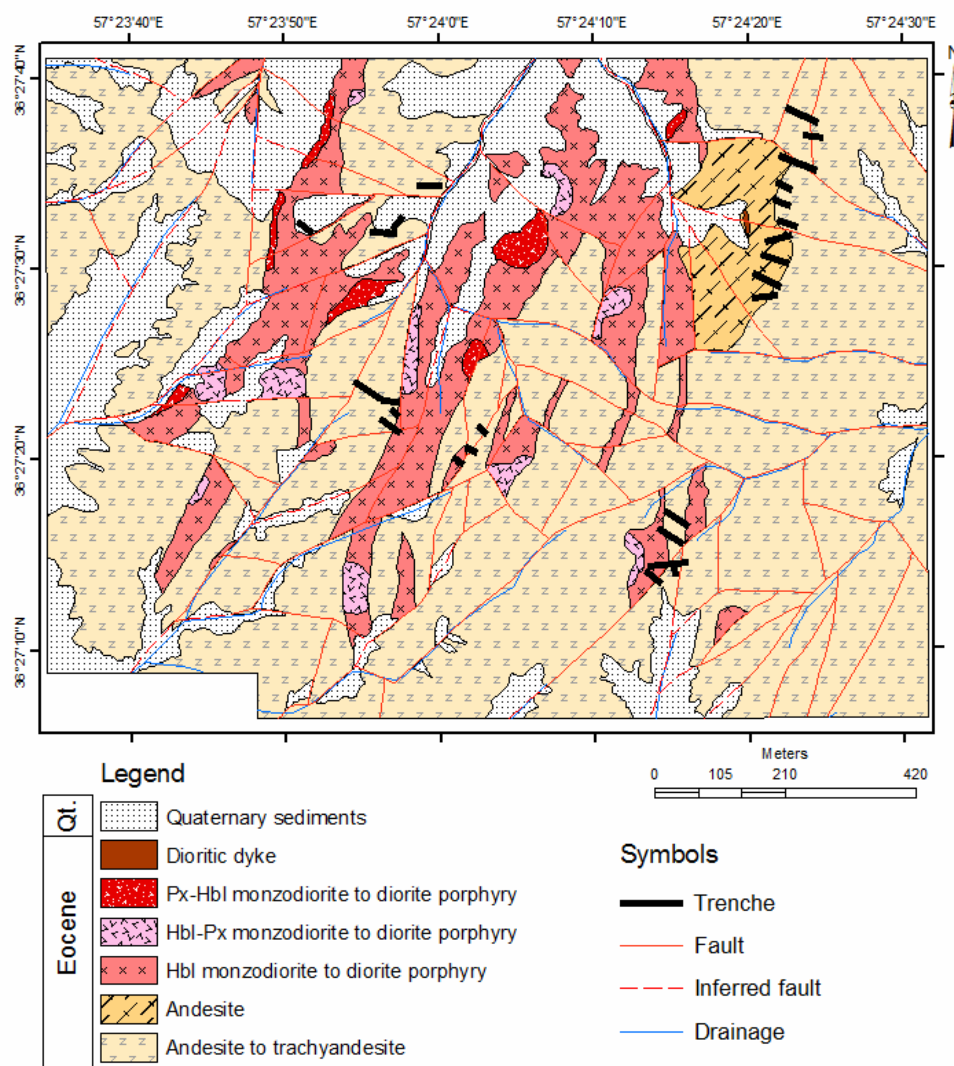
منطقه جلمبادان در شمال شرق نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ باشتین [۱۰] قرار دارد. براساس این نقشه قدیمیترین واحدهای سنگی منطقه مجموعه سنگ‌های مافیک- فرامافیک افیولیت سبزوار است که وابسته به کرتاسه هستند. این مجموعه شامل هارزبورگیت، دونیت، گابرو و دیاباز است که به شدت سرپانتینی شده‌اند. گسترش این واحدها بیشتر در جنوب و برخی در شمال غربی و شمال شرقی منطقه دیده می‌شود. همچنین مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی- رسوبی زیردریایی کرتاسه که مربوط به بخش‌های بالایی مجموعه افیولیتی است در شرق و غرب ناحیه رخنمون دارند که بیشتر شامل گدازه‌های بازالتی و آندزیتی- بازالتی، آگلومرا و برش آتشفشانی همراه با میان لایه‌های آهک و شیل است [۱۰]. پس از جایگیری مجموعه افیولیتی سبزوار و ادامه فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس سبزوار به زیر صفحه توران، فعالیت‌های ماگمایی از اوایل ائوسن آغاز شده است و به دلیل تداوم فرورانش پوسته اقیانوسی و هضم آن، آخرین فراورده‌های ماگمایی آن تا پلیو- پلیوستوسن فوران داشته است. این مسأله باعث تشکیل کمان ماگمایی قوچان- سبزوار شده است. سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی کمان براساس بررسی‌های [۲] به سه گروه سنگ‌های آذرین حدواسط ائوسن، سنگ‌های اسیدی الیگوسن- پلیوسن و سنگ‌های قلیایی میوسن- پلیستوسن (بازالت قلیایی و شوشونیت) قابل تقسیم است. سن سنگ‌های آذرین این کمان از ائوسن در جنوب (در نزدیکی افیولیت سبزوار) تا پلیو- پلیستوسن به

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]

سمت شمال (جنوب قوچان) تغییر می‌کند. جوانترین واحدهای سنگی در مقیاس ناحیه‌ای نیز رسوبات آواری نوزا و نهشته‌های کواترنری هستند.

واحدهای سنگی در منطقه اکتشافی جلمبادان که بخشی از جنوبی‌ترین قسمت‌های کمان ماگمایی قوچان- سبزوار است، شامل سنگ‌های آتشفشانی و نفوذی‌های نیمه‌عمیق حدواسط ائوسن است (شکل ۲). بخش اعظم منطقه از گدازه‌های آندزیتی تا تراکی آندزیتی پوشیده شده است که عمده با مورفولوژی صخره‌ساز و رنگ خاکستری تیره تا سبز تیره (بر اثر دگرسانی پروپلیتیک) در صحرا مشخص می‌شود. بافت آن پورفیری است و درشت بلورهای پلاژیوکلاز و برخی کانی‌های آهن و منیزیم‌دار دگرسان شده را می‌توان در آنها تشخیص داد.

واحد آندزیت که رخنمون آن در شمال شرقی منطقه دیده می‌شود، با رنگ خاکستری روشن در مناطق با دگرسانی کمتر و رنگ‌های سفید مایل به قهوه‌ای تا قرمز در مناطق دارای دگرسانی آرژیلی همراه با اکسیدهای آهن از دیگر واحدهای آتشفشانی متمایز می‌شود. مرز این واحد در شمال و جنوب گسلی است و توده‌های نفوذی مونزودیوریتی تا دیوریتی در آن نفوذ کرده‌اند. یک آذرین تیغه دیوریتی با امتداد شمالی- جنوبی و طول تقریبا ۴۰ متر نیز در این واحد دیده می‌شود (شکل ۲). واحدهای آتشفشانی منطقه جلمبادان از جنوب بر واحدهای سرپانتینیتی شده افیولیت‌های سبزوار رانده شده‌اند و از شمال نیز توسط گسل اصلی با روند شمال غربی- جنوب شرقی کنترل می‌شوند.



شکل۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه جلمبادان (تصحیح شده توسط نویسندگان بعد از [۹])

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]

توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق منطقه جلمبادان ترکیب مونزودیوریتی تا دیوریتی دارند و به شکل خرد ژرف سنگ و دایک در واحدهای آتشفشانی آندزیتی- تراکی آندزیتی نفوذ کرده‌اند. نفوذ این واحدهای نیمه‌عمیق منجر به تشکیل دگرسانی‌هایی همچون آرژیلی و سیلیسی- سرسیتی، کانی-سازی سولفیدی و ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی شده است، به طوریکه کانی‌سازی پیریت افشان همراه با اکسیدهای آهن در بخش‌های مختلف واحدهای آتشفشانی به ویژه در نزدیکی توده‌های نفوذی دیده می‌شود. در برخی نقاط، گسل‌های راستالغز منجر به جابه‌جایی توده‌ها شده‌اند. ریخت این توده‌ها خشن و صخره‌ساز بوده و براساس نوع دگرسانی و حضور پهنه-های گوسان، رنگ آنها در بخش‌های مختلف منطقه متغیر است. بافت این توده‌ها پورفیری با زمینه دانه‌ریز است و می‌توان آنها را برپایه حضور و مقدار کانی‌های آهن و منیزیم‌دار به سه واحد هورنبلند مونزودیوریت تا دیوریت پورفیری، هورنبلند-پیروکسن مونزودیوریت تا دیوریت پورفیری و پیروکسن-هورنبلند مونزودیوریت تا دیوریت پورفیری تفکیک کرد. واحد هورنبلند مونزودیوریت تا دیوریت پورفیری گسترده‌ترین و مهمترین توده نفوذی منطقه است (شکل ۲). پلاژیوکلاز، هورنبلند و پیروکسن که اغلب به کانی رسی، کلسیت، کلریت و اپیدوت تجزیه شده‌اند، مهمترین کانی‌های این توده‌ها هستند. کانی پیریت به شکل افشان که بیشتر اکسید شده‌اند در بخش-های مختلف این توده‌ها دیده می‌شود.

بررسی گسل‌ها و درز و شکستگی‌های منطقه نشان می‌دهد که روند غالب آنها شمال شرقی- جنوب غربی است، هرچند که شکستگی‌هایی با روند شمال- جنوب، شرقی- غربی و شمال غربی – جنوب شرقی نیز وجود دارد [۹]. فعالیت‌های زمین-ساختی منطقه و وجود گسل‌ها و درز و شکستگی‌های فراوان، مکان‌های مناسب برای نفوذ توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق، بالا آمدن محلول‌های ماگمایی- گرمابی کانه‌دار و ایجاد دگرسانی و کانی‌سازی را در منطقه فراهم کرده است.

روش بررسی

در راستای دستیابی به اهداف مورد نظر، برداشت اطلاعات صحرایی و نمونه‌برداری از واحدهای سنگی، پهنه‌های دگرسانی و محل‌های کانی‌سازی انجام شد. در مجموع تعداد حدود ۱۵۰ نمونه جمع‌آوری شد که از این میان ۷۸ مقطع نازک، ۵ مقطع نازک صیقلی و ۱۲ قطعه صیقلی تهیه و بررسی شدند. نقشه-های زمین‌شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی منطقه در نرم‌افزار ArcGIS به ترتیب تصحیح و تهیه شدند. در این مرحله هدف شناسایی و تفکیک توده‌های نفوذی، پهنه‌های دگرسانی و بررسی ارتباط آنها با کانی‌سازی بوده است. همچنین از نتایج تجزیه ۱۸۲ نمونه خرده‌سنگی ترانشه‌ها که برای عنصر طلا به روش عیارسنجی و ۲۳ نمونه که برای سایر عناصر به روش ICP-OES در شرکت زرآزما توسط شرکت رادین معدن ایرانیان برداشت و تجزیه شده بود [۹]، استفاده شد. نقشه‌های زمین‌شیمیایی لازم تهیه شد و داده‌ها به کمک اطلاعات زمین-شناسی، دگرسانی و کانی‌سازی تعبیر و تفسیر شد. پس از بررسی‌های دقیق سنگ‌نگاری، تعداد ۶ نمونه از توده‌های نفوذی کمتر دگرسان نیز برای بررسی‌های سنگ‌نگاری انتخاب شدند. این نمونه‌ها برای اکسیدهای اصلی در مرکز تحقیقات مواد معدنی ایران به روش XRF و برای عناصر فرعی و خاکی-نادر در آزمایشگاه ACME کانادا به روش ICP-MS (کد LF100) با روش آماده‌سازی ذوب قلیایی مورد تجزیه قرار گرفتند.

سنگ‌شناسی

واحدهای آندزیتی- تراکی آندزیتی: بافت این واحدها پورفیری تا گلومروپورفیری با زمینه دانه‌ریز تا متوسط و گاهی تراکیتی است. ۱۰ تا ۱۵ درصد کانی درشت‌بلور که بیشتر پلاژیوکلاز و بسیار کمتر فلدسپات پتاسیم هستند، از مشخصه‌های این واحدهاست. در بخش‌هایی آثار هورنبلندهای سوخته (۳ تا ۴ درصد) نیز دیده می‌شود. زمینه این سنگ‌ها بیشتر از ریزبلور-های پلاژیوکلاز، کانی‌های کدر (مگنتیت) و کانی‌های ثانویه تشکیل شده است (شکل‌های ۳ الف و ب). کلریت، اپیدوت، کلسیت، کوارتز، کانی‌های رسی، سرسیت و برخی پیریت‌های اکسید شده کانی‌های ثانویه مهم هستند که به شکل‌های پراکنده، جانشینی، رگچه و پرکننده حفره‌های دیده می‌شوند.

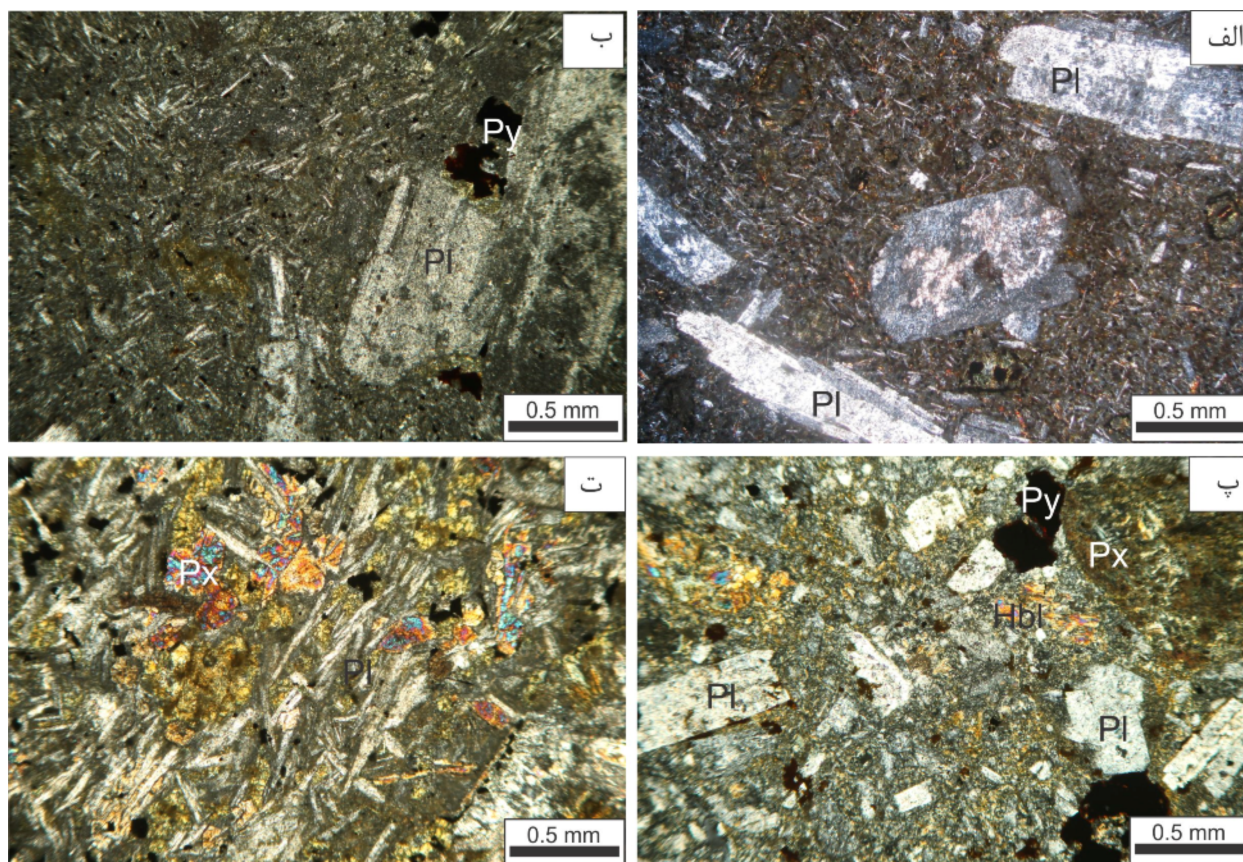
توده‌های مونزودیوریتی تا دیوریتی: بافت آنها بیشتر پورفیری با زمینه دانه متوسط تا دانه درشت و گاهی نیمه خودریخت دانه‌ای است. درصد درشت بلورها از ۲۵ تا ۴۵ درصد در بخش-های مختلف متغیر است. پلاژیوکلاز عمده‌ترین کانی تشکیل دهنده این واحدهاست که مقدار آن گاهی به ۶۰ درصد می-رسد. مقدار فلدسپات پتاسیم بین ۵ تا ۱۵ درصد متغیر است. پیروکسن و هورنبلند مهمترین کانی‌های آهن و منیزیم‌دار این توده‌ها هستند که مقدار آنها در قسمت‌های مختلف در تغییر

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]

است و در برخی نقاط فقط هورنبلند دیده می‌شود. پیروکسن بین ۲ تا ۱۵ درصد و هورنبلند بین ۵ تا ۱۰ درصد در بخش‌های مختلف مشاهده می‌شود (شکل‌های ۳ پ و ت) و در بیشتر نقاط به کلریت، اپیدوت، کلسیت و اکسید آهن (بین ۲۰ تا ۲۵ درصد) تجزیه شده‌اند. در برخی نمونه‌ها، کانی بیوتیت در حد کمتر از ۲ درصد نیز دیده شده است. کانی‌های کدر (مگنتیت)، زیرکن و آپاتیت مهمترین کانی‌های فرعی هستند. کانی‌های رسی، کوارتز، سرسیت، کلریت و کلسیت همراه با پیریت (که اغلب اکسید شده‌اند) کانی‌های ثانویه مهم هستند که به شکل‌های پراکنده، جانشینی و به ندرت رگچه و با مقادیر متفاوت در پهنه‌های دگرسانی مختلف دیده می‌شوند.

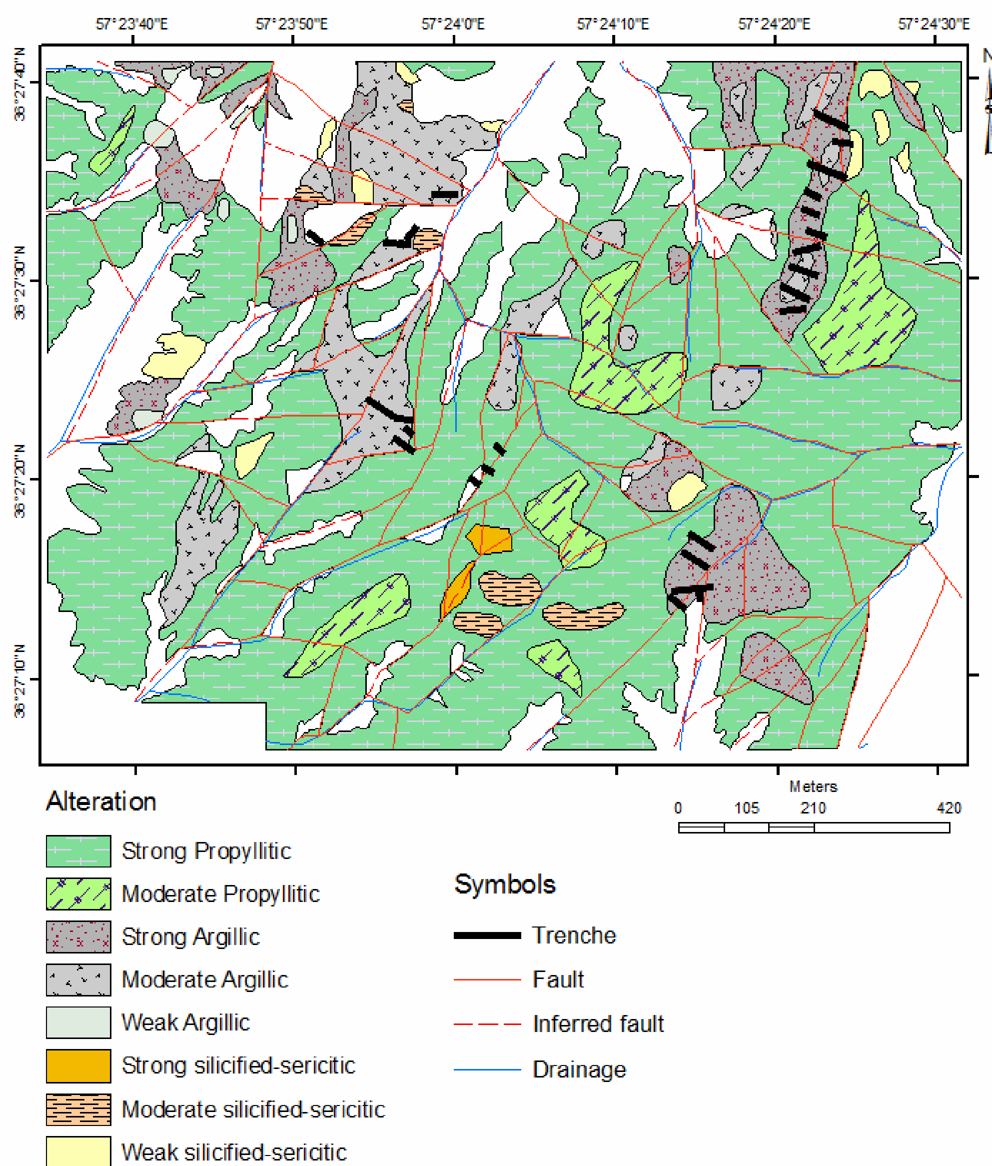
دگرسانی و کانی‌سازی

دگرسانی گسترده‌ای در منطقه جلمبادان دیده می‌شود که همه واحدهای آتشفشانی و توده‌های نفوذی را تحت تاثیر قرار داده است. دگرسانی وسیع در این منطقه تحت تاثیر فعالیت‌های گرمابی همراه با جایگیری توده‌های نفوذی بوده است. برپایه بررسی‌های صحرایی و آزمایشگاهی سه پهنه دگرسانی در منطقه قابل تشخیص است که به انواع سیلیسی- سرسیتی، آرژیلی و پروپلیتی تفکیک شدند (شکل‌های ۴ و ۵ الف). هر یک از این پهنه‌ها براساس شدت دگرسانی نیز به سه زیرگروه شدید (بیش از ۴۵ درصد حجم سنگ)، متوسط (بین ۳۰ تا ۴۵ درصد حجم سنگ) و ضعیف (بین ۱۰ تا ۳۰ درصد حجم سنگ) تقسیم‌بندی شد (شکل ۴).



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپیکی واحدهای سنگی منطقه جلمبادان. الف) بافت پورفیری با زمینه تراکیتی در واحد آندزیتی تا تراکی آندزیتی. درشت بلورهای فلدسپات که به کلسیت دگرسان شده‌اند، ب) درشت بلورهای پلاژیوکلاز در زمینه‌ای از ریزبلورهای پلاژیوکلاز در واحد آندزیت همراه با کانی‌سازی پراکنده پیریت، پ) بافت پورفیری با زمینه نسبتاً دانه ریز در توده مونزودیوریتی تا دیوریتی با درشت بلورهای پلاژیوکلاز، پیروکسن و هورنبلند همراه با کانی‌سازی پیریت پراکنده، ت) توده مونزودیوریتی تا دیوریتی با بافت پورفیری با زمینه دانه درشت که شبیه به بافت نیمه خودریخت دانه‌ای به نظر می‌رسد. (همه عکس‌ها در نور XPL گرفته شده است) (Pl= پلاژیوکلاز، Px= پیروکسن، Hbl= هورنبلند، Py= پیریت [۱۱]).

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]



شکل۴ نقشه دگرسانی منطقه جلمبادان.

سیلیسی- سرسیتی: این دگرسانی کمترین گسترش را در منطقه دارد و در نقاط محدودی در جنوب، شمال شرقی و شمال غربی جلمبادان دیده می‌شود. واحدهای آندزیت تا تراکی‌آندزیت و به مقدار کمتر توده‌های مونزودیوریتی تا دیوریتی تحت تاثیر این پهنه قرار گرفته‌اند. رنگ دگرسانی سیلیسی- سرسیتی در صحرا از کرمی - خاکستری روشن (در شدت‌های ضعیف) تا قرمز- قهوه‌ای (در شدت‌های متوسط تا شدید) به علت وجود اکسیدهای آهن حاصل از اکسایش سولفیدها متغیر است. کانی‌های اصلی این پهنه کوارتز و سرسیت و کانی فرعی پیریت و کانی‌های رسی هستند (شکل ۵ ب). کوارتز ثانویه بیشتر در زمینه سنگ و به ندرت رگچه‌های باریک با فراوانی ۱۰ درصد در شدت‌های ضعیف تا حدود ۴۰ درصد حجم سنگ در بخش‌های شدید دیده می‌شود. سرسیت بیشتر جانشین فلدسپات‌های سنگ شده و کمتر در متن سنگ حضور دارد. مقدار این کانی از ۱۰ درصد در شدت‌های ضعیف تا حدود ۲۵ درصد حجم سنگ در بخش‌های شدید متغیر است. در بخش‌هایی از پهنه سیلیسی- سرسیتی شدید، فلدسپات‌ها تا ۹۰ درصد به سرسیت تبدیل شده‌اند. قالب‌های

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]

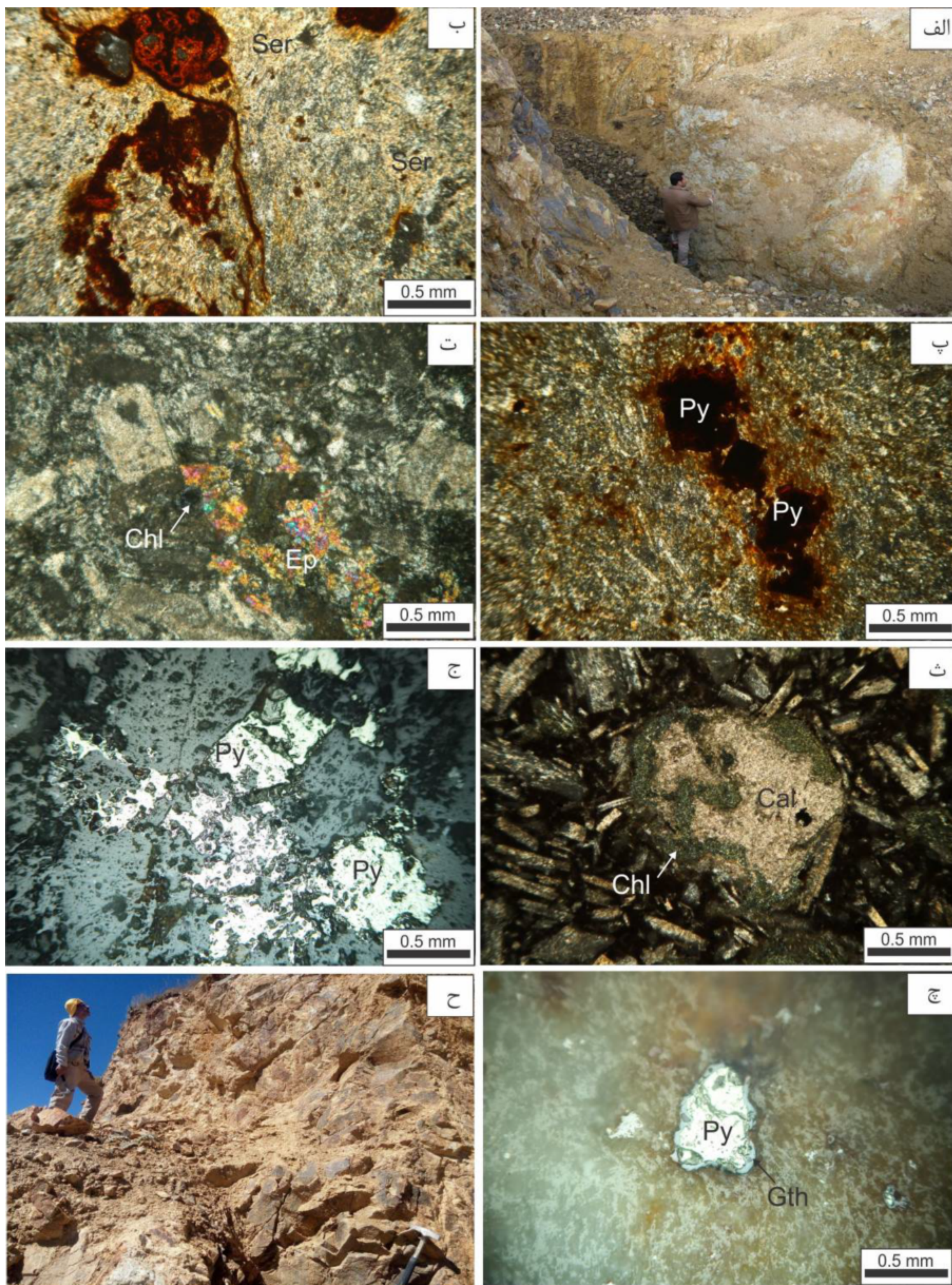
پیریت که بیشتر به گوتیت و هماتیت اکسید شده‌اند، گاهی تا ۱۰ درصد در بخش‌های متوسط تا شدید این پهنه در جنوب منطقه جلمبادان دیده می‌شود. کانی‌های رسی نیز بر اثر هوازدگی سطحی، اکسید شدن سولفیدها و به وجود آمدن شرایط اسیدی، از تبدیل شدن سرسیت یا فلدسپات‌ها تشکیل شده‌اند.

آرژیلی: این دگرسانی در بخش‌های مختلف منطقه جلمبادان دیده می‌شود و ارتباط تنگاتنگی با پهنه‌های گسلی دارد. واحدهای آندزیتی- تراکی آندزیتی و توده‌های نفوذی مونزودیوریتی تا دیوریتی تحت تاثیر این دگرسانی قرار گرفته‌اند. رنگ آن در صحرا از سفید تا سفید مایل به قرمز- قهوه‌ای (در اثر وجود اکسیدهای آهن ثانویه) متغیر است. کانی‌های رسی کانی اصلی و کوارتز، کلریت و کلسیت کانی‌های فرعی این پهنه هستند (شکل ۵ پ). در بخش‌هایی که دگرسانی آرژیلی شدت یافته است، بیشتر فلدسپات‌ها تا ۱۰۰ درصد به کانی رسی تبدیل شده‌اند. مقدار کانی رسی به شکل جانشین شده و نیز در متن سنگ غالبا بین ۳۰ تا ۵۰ درصد حجم سنگ متغیر است. براساس نتایج XRD [۹]، کانی کائولینیت مهمترین کانی رسی منطقه است. کوارتز ثانویه تا ۱۵ درصد و اپیدوت و کلسیت در مجموع تا ۵ درصد کانی‌های دیگر تشکیل دهنده این پهنه هستند. قالب سولفیدهای اکسید شده پراکنده که بیشتر پیریت است در بخش‌هایی از شمال شرقی و جنوب شرقی این پهنه، در پهنه آرژیلی شدید و در محل ترانشه‌ها گاهی تا ۱۰ درصد می‌رسد. اکسیدهای آهن ثانویه نیز به مقدار ۱۵ درصد در برخی قسمت‌ها دیده می‌شوند.

پروپلیتی: این دگرسانی وسیعترین پهنه دگرسانی در منطقه جلمبادان است که با شدت‌های متوسط و شدید دیده می‌شود. همه واحدهای سنگی در بخش‌هایی از منطقه تحت تاثیر این پهنه قرار گرفته‌اند، اما بیشتر در واحدهای آتشفشانی مشاهده می‌شود. کلریت، اپیدوت و کلسیت کانی‌های اصلی و سرسیت کانی فرعی این پهنه را تشکیل می‌دهند. کلریت به سه شکل پراکنده در متن سنگ، جانشین شده در کانی‌های آهن و منیزیم‌دار و پلاژیوکلاز و پرکننده حفره‌ها (در سنگ‌های آتشفشانی) دیده می‌شود. میزان تبدیل این کانی‌ها به کلریت از کمتر از ۱۰ درصد تا گاهی ۶۰ درصد متغیر است. در مجموع کلریت بین ۲۰ تا ۲۵ درصد حجم سنگ دیده می‌شود. اپیدوت به شکل‌های پراکنده در متن و جانشینی بین ۱۵ تا ۳۰ درصد متغیر است. کلسیت نیز به شکل‌های رگچه‌ای، پرکننده حفره‌ها، پراکنده در متن و جانشینی در کانی‌های پیروکسن، هورنبلند، بیوتیت و پلاژیوکلاز به مقدار ۱۵ تا ۳۰ درصد حجم سنگ وجود دارد (شکل‌های ۵ ت و ث). سرسیت بیشتر به شکل جانشین شده کمتر از ۳ درصد پهنه پروپلیتی را به خود اختصاص داده است. کانی‌سازی سولفیدی افشان که اغلب اکسید شده است به ویژه در بخش‌های جنوبی منطقه در این پهنه دگرسانی و در توده‌های نفوذی دیده شده است.

آثار کنده‌کاری‌های قدیمی در منطقه جلمبادان نشان می‌دهد که این منطقه از دیرباز شناسایی شده و از اهمیت بسزایی برخوردار بوده است. کانی‌سازی به شکل افشان بیشتر در توده‌های مونزودیوریتی تا دیوریتی و همچنین سنگ‌های آتشفشانی نزدیک آنها دیده می‌شود و بیشتر در نیمه شرقی منطقه متمرکز است. تنها کانی اولیه شناخته شده پیریت است که به صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و در اندازه‌های ۰/۱ تا ۲ میلیمتر شناسایی شد (شکل ۵ ج). این کانی تقریبا در همه پهنه‌های دگرسانی حضور دارد ولی بیشتر در پهنه سیلیسی- سرسیتی و آرژیلی دیده می‌شود. مقدار این کانی از کمتر از ۲ تا بیش از ۱۰ درصد حجم سنگ متغیر است. به ندرت رگچه‌هایی به عرض تا ۰/۳ میلیمتر از پیریت در توده‌های نفوذی به چشم می‌خورد. بیش از ۶۰ درصد پیریت‌ها در سطح اکسید شده و به کانی‌های گوتیت و هماتیت تبدیل شده‌اند. پهنه گوسان گسترده‌ای در منطقه دیده می‌شود که نشان‌دهنده اهمیت کانی‌سازی آن است (شکل‌های ۵ چ و ح). اکسیدهای آهن ثانویه نیز از کمتر از ۱ درصد تا بیش از ۱۵ درصد حجم سنگ بیشتر در نیمه شرقی منطقه دیده می‌شوند و مقدار آن‌ها با مقدار پیریت‌های افشان رابطه مستقیم دارد. مالاکیت یک کانی ثانویه دیگر منطقه جلمبادان است که به شکل پراکنده و محدود در بخش‌هایی از سطح و یا در دیواره ترانشه‌ها و کارهای قدیمی دیده شده است؛ مقدار این کانی کمتر از ۴ درصد حجم سنگ است.

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]



شکل ۵ الف) تصویر صحرایی از دگرسانی آرژیلی منطقه جلمبادان همراه با اکسیدهای آهن ثانویه در دیواره ترانشه، ب) دگرسانی سرسیتی-سیلیسی همراه با کانی‌سازی سولفیدی اکسید شده در نور XPL، پ) دگرسانی آرژیلی همراه با کانی‌سازی پیریت در نور XPL، ت) کلریت و اپیدوت پهنه پروپلیتی در توده نفوذی در نور XPL، ث) کلسیت و کلریت به شکل پرکننده حفره‌ها در واحد آندزیتی در نور XPL، ج) کانی‌سازی پیریت پراکنده در توده مونزودیوریتی تا دیوریتی در نور بازتابی و PPL، چ) تبدیل پیریت به گوتیت در نور بازتابی و PPL، ح) تصویری از پهنه گوسان در صحرا (Ser= سرسیت، Py= پیریت، Ep= اپیدوت، Chl= کلریت، Cal= کلسیت، Gth= گوتیت [۱۱]).

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]

زمین‌شیمی اکتشافی

پی‌جویی‌های زمین‌شیمیایی ناحیه‌ای در منطقه جلمبادان، نخست به روش رسوبات آبراهه‌ای در منطقه‌ای به وسعت ۳۱ کیلومتر مربع و در قالب برداشت ۶۵ نمونه توسط شرکت رادین معدن ایرانیاین [۹] انجام شد. نتایج تجزیه طلا به روش عیارسنجی گرمایی نشان می‌دهد که مقدار این عنصر از کمتر از ۳ تا ۱۸۵ میلی‌گرم در تن متغیر است و بیشترین مقادیر مربوط به آبراهه‌های ناشی از توده‌های نفوذی مونزودیوریتی تا دیوریتی است. مقدار مس نیز (به روش ICP-OES) بین ۲۹ تا ۲۱۴ گرم در تن متغیر است که بیشترین مقادیر مس، همخوانی خوبی با بیشترین مقدار طلا دارد [۹]. این مساله نشان‌دهنده ناهنجاری قابل توجه طلا و مس در منطقه جلمبادان و اهمیت نقش توده‌های نفوذی مونزودیوریتی تا دیوریتی در ایجاد کانی‌سازی و ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی است.

نتایج تجزیه نمونه‌های خرده‌سنگی برداشت شده توسط شرکت رادین معدن ایرانیان [۹] در جدول (۱) ارائه شده است. در این جدول، نتایج ۲۳ نمونه که برای عناصر مس، سرب، روی و نقره به روش ICP-OES تجزیه شده‌اند به شکل مستقیم و نتایج ۱۸۲ نمونه که برای طلا به روش عیارسنجی گرمایی تجزیه شده بودند، به شکل میانگین برای هر ترانشه آورده شده است.

جدول ۱ نتایج تجزیه نمونه‌های خرده‌سنگی برداشت شده از ترانشه‌ها در منطقه جلمبادان توسط شرکت رادین معدن ایرانیان [۹] به روش عیارسنجی گرمایی برای طلا (میلی‌گرم در تن) و ICP-OES برای سایر عناصر (گرم در تن). مقادیر طلا، میانگین مقدار در هر ترانشه است.

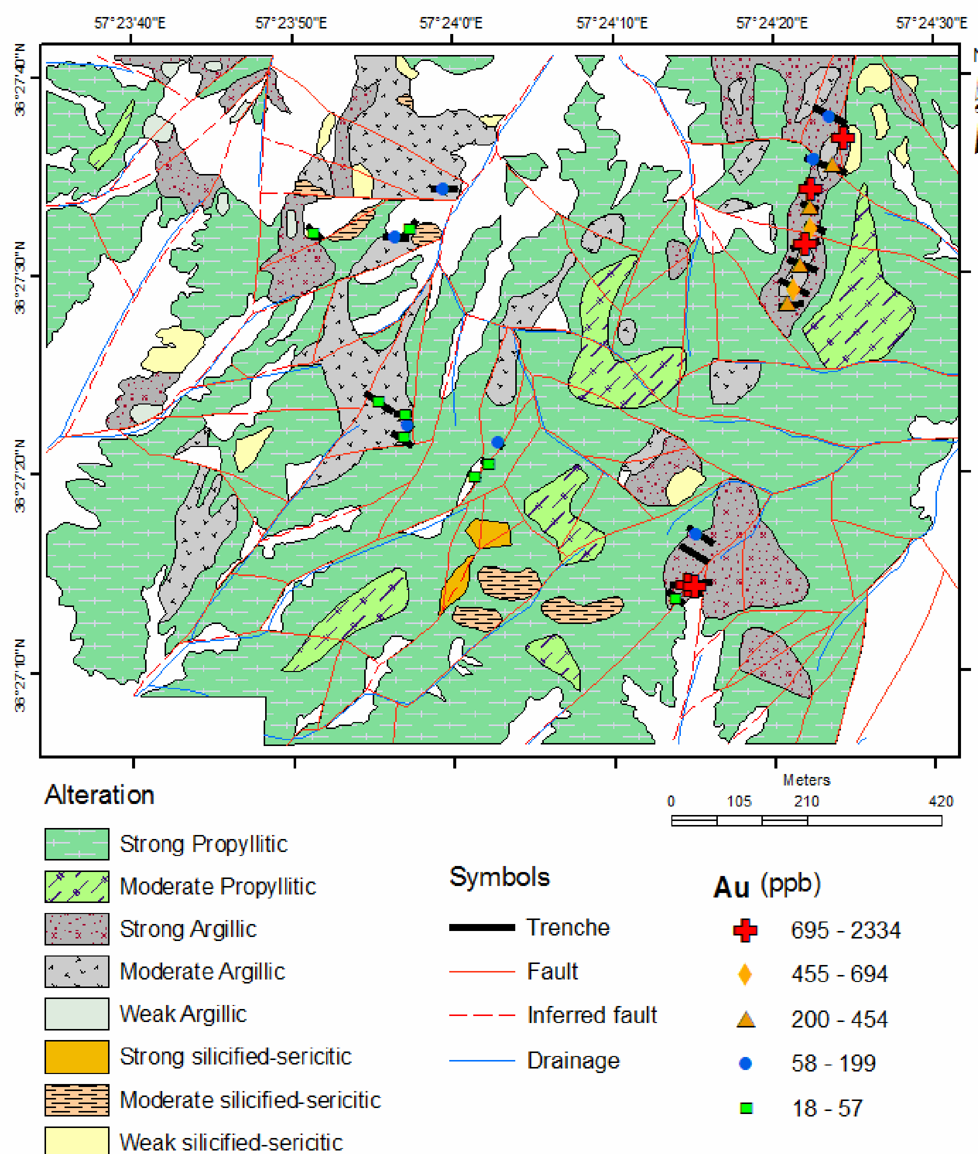
نام ترانشه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	Au	Ag	Cu	Pb	Zn
JT-15	۵۷° ۲۴′ ۲۳″	۳۶° ۲۷′ ۳۸″	۱۹۹	۰٫۱۵	۷	۱۱	۱۲
JT-14	۵۷° ۲۴′ ۲۴″	۳۶° ۲۷′ ۳۷″	۱۸۸۷	۰٫۲	۲۶	۱۳	۲۲
JT-13	۵۷° ۲۴′ ۲۴″	۳۶° ۲۷′ ۳۵″	۳۵۹	۰٫۲	۳۸	۱۱	۵۵
JT-03	۵۷° ۲۴′ ۲۳″	۳۶° ۲۷′ ۳۶″	۱۳۸	۰٫۴۹	۱۶۷	۶	۲۸
JT-12	۵۷° ۲۴′ ۲۲″	۳۶° ۲۷′ ۳۴″	۱۶۰۱	۰٫۱۸	۷	۹	۲۲
JT-11	۵۷° ۲۴′ ۲۲″	۳۶° ۲۷′ ۳۳″	۲۷۰	۰٫۱۶	۹۲	۷	۲۰
JT-10	۵۷° ۲۴′ ۲۲″	۳۶° ۲۷′ ۳۲″	۶۹۴	۰٫۲۶	۲۴	۲۳	۹۰
JT-09	۵۷° ۲۴′ ۲۲″	۳۶° ۲۷′ ۳۱″	۲۳۳۴	۰٫۲۷	۵۴	۲۲	۵۷
JT-08	۵۷° ۲۴′ ۲۲″	۳۶° ۲۷′ ۳۰″	۳۵۲	۳۱	۱۱۰	۶	۸۵
JT-07	۵۷° ۲۴′ ۲۱″	۳۶° ۲۷′ ۲۹″	۵۷۹	۰٫۲۳	۸۳	۶	۵۶
JT-06	۵۷° ۲۴′ ۲۱″	۳۶° ۲۷′ ۲۹″	۵۴۵	۰٫۲۲	۴۵۸	۱۸	۲۶
JP1-T1	۵۷° ۲۳′ ۵۱″	۳۶° ۲۷′ ۳۲″	۵۷	۰٫۱۶	۶۰	۱۱	۳۷
JP1-T2	۵۷° ۲۳′ ۵۶″	۳۶° ۲۷′ ۳۲″	۱۳۶	–	–	–	–
JP1-T3	۵۷° ۲۳′ ۵۷″	۳۶° ۲۷′ ۳۲″	۱۸	–	–	–	–
JP2-T1	۵۷° ۲۳′ ۵۹″	۳۶° ۲۷′ ۳۴″	۱۲۷	–	–	–	–
JT-16	۵۷° ۲۴′ ۰۱″	۳۶° ۲۷′ ۲۰″	۵۰	۰٫۴۳	۲۰۹	۷	۲۸
JT-17	۵۷° ۲۴′ ۰۲″	۳۶° ۲۷′ ۲۰″	۵۶	۰٫۱۶	۳۲	۱۲	۲۲
JT-05	۵۷° ۲۴′ ۰۳″	۳۶ ° ۲۷′ ۲۲″	۱۳۵	۰٫۲۲	۳۶۵	۷	۴۱
JT-20	۵۷° ۲۳′ ۵۷″	۳۶° ۲۷′ ۲۲″	۲۴	۰٫۲۲	۱۹	۸	۲۶
JT-21	۵۷° ۲۳′ ۵۷″	۳۶° ۲۷′ ۲۲″	۱۷۱	۰٫۱۵	۱۲	۷	۲۴
JT-18	۵۷° ۲۳′ ۵۷″	۳۶° ۲۷′ ۲۳″	۵۰	۰٫۱۴	۱۰	۸	۱۴
JT-19	۵۷° ۲۳′ ۵۵″	۳۶° ۲۷′ ۲۴″	۲۲	۰٫۱۷	۷	۶	۲۷
JT-04	۵۷° ۲۴′ ۱۵″	۳۶° ۲۷′ ۱۷″	۱۷۲	۰٫۳۴	۱۸۵	۶	۳۲
JT-02	۵۷° ۲۴′ ۱۴″	۳۶° ۲۷′ ۱۴″	۱۵۸۷	۰٫۲۲	۲۱۸	۷	۱۱۵
JT-01	۵۷° ۲۴′ ۱۴″	۳۶° ۲۷′ ۱۴″	۳۱	۰٫۱۷	۳۰	۶	۴۷
JR	۵۷° ۲۴′ ۱۵″	۳۶° ۲۷′ ۱۴″	۲۱۹۲	۰٫۵۸	۵۰۹	۱۴۱	–

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]

میانگین مقدار طلا در ترانشه‌ها بین ۱۸ تا ۲۳۳۴ میلی‌گرم در تن متغیر است (جدول ۱ و شکل ۶). بیشترین مقادیر طلا (بین ۰/۲ تا بیش از ۲ گرم در تن) در شمال شرقی و جنوب شرقی منطقه و منطبق بر واحدهای آتشفشانی آندزیتی تا تراکی آندزیتی است که دایک دیوریتی و توده‌های نفوذی دیوریتی تا مونزودیوریتی در آنها نفوذ نموده‌اند. در این قسمت-ها، دگرسانی آرژیلی شدید همراه با حضور اکسیدهای آهن ثانویه و آثار اکسیدشدن سولفیدها دیده می‌شود.

مقدار مس بین ۷ تا ۵۰۹ گرم در تن متغیر است (جدول ۱). بیشترین مقادیر مس (بیش از ۱۱۱ گرم در تن) همانند طلا در ترانشه‌های شمال شرقی و جنوب شرقی منطقه و منطبق بر واحدهای آتشفشانی و توده‌های نفوذی، دگرسانی آرژیلی شدید و پهنه‌های گوسان مشاهده می‌شود. در این بخش‌ها، مالاکیت تنها کانی مس است که در دیواره ترانشه‌ها دیده می‌شود. در برخی نمونه‌ها، همبستگی مثبتی بین طلا و مس وجود دارد.

بیشینه مقدار نقره ۰/۵۸ گرم در تن، سرب ۱۴۱ گرم در تن و روی ۱۱۵ گرم در تن است (جدول ۱) که به نسبت پایین هستند و اهمیتی ندارند. کانی‌های این عناصر نیز در منطقه دیده نشده است.



شکل ۶ نقشه زمین‌شیمیایی میانگین مقادیر طلا در نمونه‌های خرده‌سنگی برداشت شده از ترانشه‌ها در منطقه جلمبادان بر نقشه دگرسانی.

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]

زمین‌شیمی توده‌های نفوذی

به منظور بررسی زمین‌شیمی و تعیین جایگاه زمین‌ساختی و خاستگاه توده‌های نفوذی در منطقه جلمبادان، تعداد ۶ نمونه با کمترین دگرسانی از واحدهای مونزودیوریتی تا دیوریتی انتخاب شد. با توجه به گستردگی دگرسانی منطقه به ویژه حضور کانی رسی، سرسیت و کوارتز ثانویه در سنگ‌ها، انتخاب نمونه‌هایی با کمترین دگرسانی در منطقه بسیار مشکل بود که در نهایت پس از بررسی‌های فراوان سنگ‌نگاری، نمونه‌ها برگزیده شدند. با این وجود، سعی شد تا برای جلوگیری از هرگونه خطا و احتیاط بیشتر در تفسیرها، بیشتر از نمودارهایی که برپایه عناصر فرعی یا خاکی‌نادر است، استفاده شود. جدول (۲) نتایج تجزیه توده‌های نفوذی منطقه را نشان می‌دهد. مقدار SiO_2 توده‌ها بین ۴۷٫۴۳ تا ۵۶٫۸۶ درصد متغیر است. در نمودار نامگذاری [۱۲]، نمونه‌های مونزودیوریتی تا دیوریتی جلمبادان در محدوده مونزونیت، مونزودیوریت، دیوریت، دیوریت گابرویی و گابرو قرار گرفته‌اند (شکل ۷ الف). برپایه مقادیر Ce/Yb نسبت به Ta/Yb [۱۳] (شکل ۷ ب) همه توده‌ها از نوع آهکی-قلیایی هستند. برای تعیین میزان اشباع پذیری سنگ‌ها از آلومینیوم (شاخص اشباع آلومین)، از نمودار دوتایی نسبت‌های مولار (Al_2O_3/Na_2O+K_2O) یا A/NK نسبت به (Al_2O_3/Na_2O+K_2O+CaO) یا A/CNK [۱۴] استفاده شد که همه نمونه‌ها در موقعیت متاآلومین قرار گرفتند (شکل ۷ پ). برپایه پیشنهاد [۱۵] توده‌های گرانیتوئیدی نوع I دارای مقادیر A/CNK کمتر از ۱٫۱ و گرانیتوئیدهای نوع S دارای A/CNK بیش از ۱٫۱ هستند. از این نظر نیز توده‌های نفوذی مونزودیوریتی تا دیوریتی جلمبادان در محدوده گرانیتوئیدهای I (سری اکسیدان) قرار می‌گیرند (شکل ۷ پ). این موضوع با حضور کانی‌هایی مانند پیروکسن، هورنبلند، بیوتیت و کانی فرعی مگنتیت تایید می‌شود. توده‌های نفوذی جلمبادان در نمودار Rb نسبت به Ta+Nb [۱۶] در محیط گرانیتوئیدهای کمان ماگمایی پهنه فرورانش قرار گرفته‌اند (شکل ۷ ت).

عناصر REE جزو عناصر با کمترین قابلیت انحلال بوده و در فرایندهایی مثل هوازدگی، دگرگونی درجه پایین و دگرسانی گرمابی به نسبت غیر متحرک هستند [۱۷]. بنابراین الگوی فراوانی آنها می‌تواند نشان‌دهنده خاستگاه آذرین سنگ‌ها باشد. نمودار عناصر خاکی‌نادر توده‌های مونزودیوریتی تا دیوریتی بهنجار شده نسبت به کندریت [۱۸]، یک غنی شدگی متوسط در عناصر خاکی نادر سبک (LREE) نسبت به عناصر خاکی-نادر سنگین (HREE) که روند نسبتاً مسطح را نشان می‌دهند، دارد (شکل ۷ ث). نسبت $(La/Yb)_N$ که بین ۳٫۰۹ تا ۵٫۸۵ است این مسأله را تایید می‌کند (جدول ۱). این روند غنی‌شدگی در LREE نسبت به HREE شاخص ماگمای تشکیل شده در پهنه فرورانش است [۱۹-۲۱]. نسبت Sr/Y عمدتاً به وسیله فراوانی نسبی گارنت، آمفیبول و پلاژیوکلاز در باقیمانده کنترل می‌شود؛ به طوریکه مقدار بالای گارنت و مقادیر پایین آمفیبول و پلاژیوکلاز در باقیمانده سبب ایجاد نسبت Sr/Y بالا در گدازه می‌شود [۲۲]. توده‌های نفوذی جلمبادان دارای نسبت Sr/Y بین ۹٫۲ تا ۴۱٫۴ هستند که بیانگر حضور اندک کانی گارنت در باقیمانده است. این امر، با مقادیر Eu/Eu* بین ۰٫۸۱ تا ۱٫۰۸ همخوانی دارد (جدول ۱). تهی‌شدگی نسبی Eu نشان دهنده‌ی تبلور جدایشی فلدسپار قلیایی در سنگ‌های منطقه است.

نمودار عنکبوتی عناصر فرعی و برخی عناصر خاکی نادر نرمالیز شده نسبت به گوشته اولیه [۲۳] برای توده‌های نفوذی در شکل ۷ ج نشان داده شده است. غلظت عناصر LILE تابعی از رفتار فاز سیال است، در صورتی که غلظت عناصر HFSE به وسیله شیمی سنگ خاستگاه و فرایندهای بلور/ گدازه که طی تشکیل سنگ صورت می‌گیرد، کنترل می‌شود [۱۷]. غنی شدگی از عناصر LILE (Sr, K, Rb, Cs) نسبت به عناصر HFSE (Nb, Ti, Y) درهمه نمونه‌ها نسبت به گوشته اولیه دیده می‌شود. غنی شدگی در عناصر LILE نسبت به HFSE نشان‌دهنده ماگمای مربوط به مناطق فرورانش است [۱۹-۲۱].

بحث

خاستگاه توده‌های مونزودیوریتی تا دیوریتی

ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی توده‌های نفوذی مونزودیوریتی تا دیوریتی جلمبادان نشان می‌دهد که این توده‌ها از نوع گرانیتوئیدهای اکسیدان نوع I با ماهیت آهکی-قلیایی هستند. همچنین الگوی عناصر خاکی نادر و غنی‌شدگی عناصر LILE نسبت به HFSE نشان دهنده تشکیل ماگما در پهنه فرورانش است. نمودار Th/Yb نسبت به Ta/Yb [۲۴] نیز موقعیت زمین‌ساختی واحدهای نفوذی جلمبادان را کمان ماگمایی کرانه قاره نشان می‌دهد (شکل ۸ الف). در این نمودار، عناصر کمیاب Ta و Th نسبت به Yb سنجیده می‌شود تا تغییرات شیمیایی ناحیه خاستگاه شامل غنی‌شدگی، آلایش پوسته‌ای و جدایش بلوری مشخص شود. وجود غیریکنواختی در خاستگاه، مقادیر Ta و Th را به طور یکسان تحت تاثیر قرار داده است و ترکیب گوشته نسبت به گوشته اولیه با یک شیب یکسان به سمت

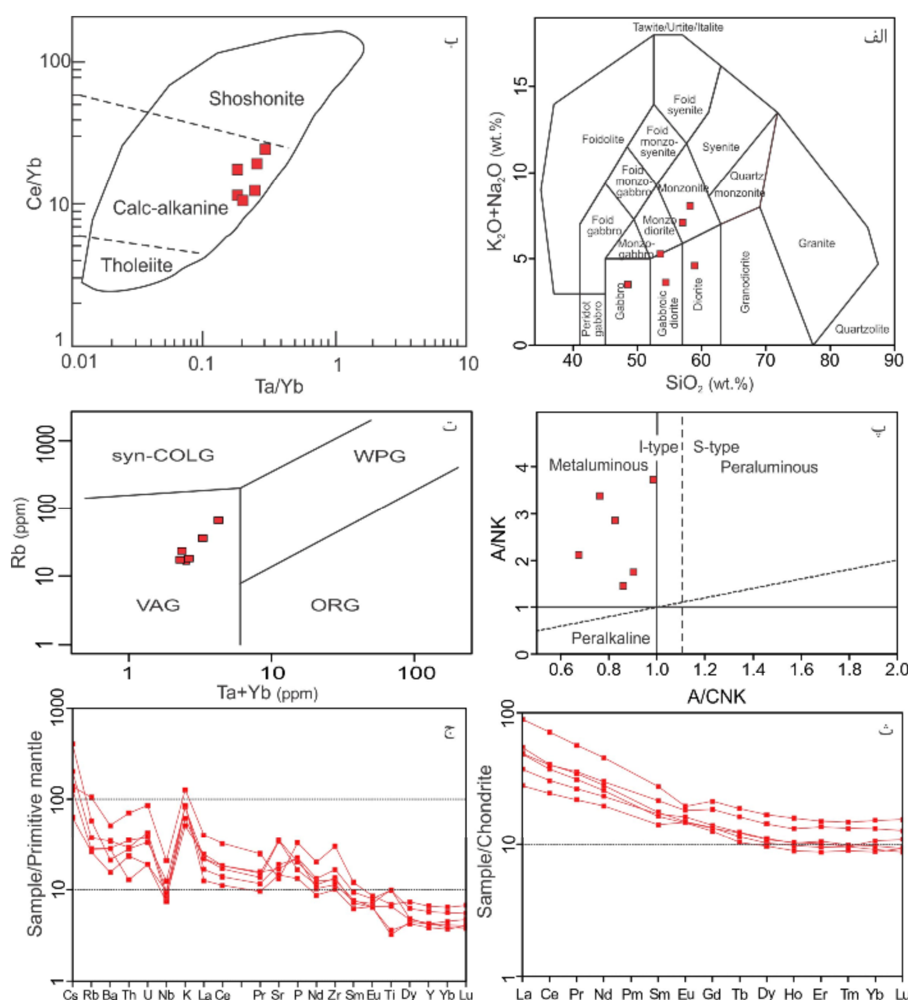
[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]

نسبت‌های بالاتر یا پایین‌تر Ta/Yb و Th/Yb جابه‌جا می‌شود [۲۵]. نسبت‌های Ta/Yb و Th/Yb همه نمونه‌های نفوذی منطقه مورد بررسی از قلمرو گوشته‌ای به سمت مقادیر بیشتر جابه‌جا شده است (شکل ۸ الف). این تغییر ترکیبی به فرآیندهای وابسته به فرورانش نسبت داده می‌شود [۲۶].

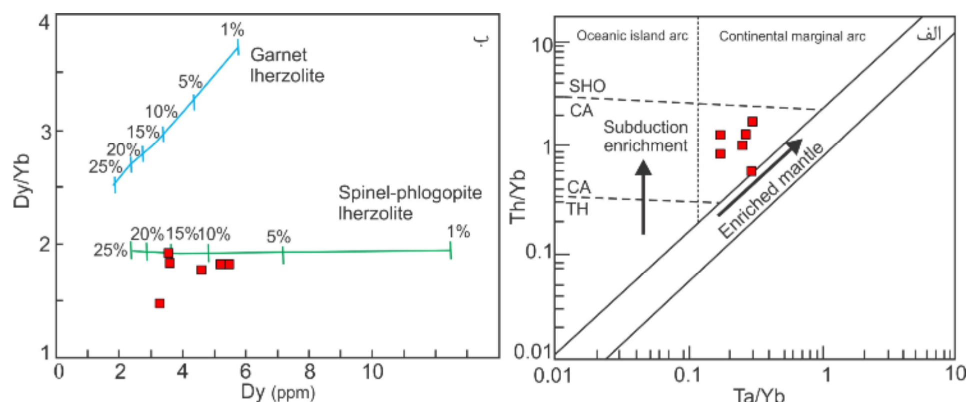
جدول۲ نتایج تجزیه اکسیدهای اصلی (٪) و عناصر فرعی و خاکی نادر (گرم در تن) توده‌های مونزودیوریتی تا دیوریتی جلمبادان.

شماره نمونه	JM20	JM21	JM23	JM28	JM3.1	JM4.1
طول جغرافیایی	۵۷° ۲۴´ ۰۲˝	۵۷° ۲۳´ ۴۹˝	۵۷° ۲۴´ ۰۷˝	۵۷° ۲۴´ ۰۰˝	۵۷° ۲۳´ ۵۶˝	۵۷° ۲۳´ ۵۱˝
عرض جغرافیایی	۳۶° ۲۷´ ۱۸˝	۳۶° ۲۷´ ۲۲˝	۳۶° ۲۷´ ۱۷˝	۳۶° ۲۷´ ۲۱˝	۳۶° ۲۷´ ۲۰˝	۳۶° ۲۷´ ۲۶˝
SiO_2	۵۱٫۲۹	۵۱٫۲۹	۵۶٫۰۶	۵۶٫۸۶	۵۵٫۰۹	۴۷٫۴۳
TiO_2	۲٫۱۸	۲٫۱۵	۰٫۷	۱٫۵	۰٫۷۸	۱٫۴۳
Al_2O_3	۱۴٫۴۱	۱۴٫۴۸	۱۶٫۶۱	۱۵٫۴۱	۱۷٫۰۴	۱۵٫۹۵
FeOt	۱۱٫۰۲	۱۱	۷٫۱۴	۸	۸٫۲۱	۱۴٫۵۵
MgO	۴٫۱۵	۴٫۱۹	۳٫۷۶	۳٫۰۴	۳٫۸۷	۶٫۵۷
MnO	۰٫۰۵	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۰۵	۰٫۱۴	۰٫۰۵
CaO	۸٫۰۵	۸٫۰۷	۷٫۸۵	۴٫۰۴	۵٫۰۴	۶٫۵۴
Na_2O	۰٫۹	۲٫۵۳	۲٫۵۳	۳٫۸۹	۴٫۷۱	۰٫۹
K_2O	۲٫۵۸	۲٫۴۹	۱٫۵۴	۳٫۵۸	۱٫۸۵	۲٫۵۹
P_2O_5	۰٫۴۸	۰٫۴۹	۰٫۴۴	۰٫۷۲	۰٫۳۶	۰٫۲۹
L.O.I	۵٫۸۵	۳٫۰۴	۳٫۲۵	۲٫۶۹	۲٫۹۱	۴٫۶۶
Total	۱۰۰٫۹۶	۹۹٫۸۵	۱۰۰	۹۹٫۷۸	۱۰۰	۱۰۰٫۹۶
Ba	۱۰۹	۱۴۹	۲۰۰	۳۶۰	۲۴۲	۱۹۹
Co	۲۲٫۱	۲۸٫۲	۱۵٫۴	۱۲٫۸	۱۶٫۴	۲۰٫۷
Cs	۰٫۵	۳٫۲	۰٫۱	۱٫۱	۱٫۶	۱
Ga	۱۵٫۹	۱۵٫۱	۱۷٫۴	۱۵	۱۶٫۵	۱۴٫۷
Hf	۳	۴٫۳	۳٫۴	۷٫۴	۳٫۶	۲٫۶
Nb	۶٫۹	۸٫۹	۶	۱۴٫۹	۶٫۶	۵٫۳
Rb	۱۶٫۷	۳۷٫۱	۱۸	۶۶٫۸	۲۳٫۹	۱۷٫۸
Sr	۴۰۲٫۷	۳۵۷٫۱	۷۴۴٫۲	۲۸۰٫۵	۷۲۹	۳۰۷٫۹
Ta	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۴	۱	۰٫۵	۰٫۴
Th	۲	۲٫۴	۳	۶	۲٫۵	۱٫۱
U	۰٫۴	۰٫۷	۰٫۸	۱٫۸	۰٫۹	۰٫۴
V	۱۸۷	۲۱۵	۱۰۲	۹۹	۱۰۲	۱۷۸
Zr	۱۲۸٫۶	۱۸۶٫۸	۱۴۳٫۳	۳۳۷٫۵	۱۵۲٫۱	۱۱۳٫۶
Y	۱۸٫۹	۲۶٫۳	۱۹٫۲	۳۰٫۳	۱۷٫۶	۱۹٫۵
La	۱۱٫۶	۱۵٫۳	۱۷	۲۷٫۷	۱۵٫۱	۸٫۷
Ce	۲۴٫۷	۳۲٫۵	۳۲٫۷	۵۷٫۶	۳۰٫۳	۱۹٫۸
Pr	۳٫۲۳	۴٫۳۶	۴٫۲۲	۶٫۹۱	۳٫۸۱	۲٫۶۷
Nd	۱۴	۱۸٫۱	۱۶٫۹	۲۷٫۴	۱۵٫۵	۱۱٫۸
Sm	۳٫۳۲	۴٫۲۰	۳٫۴۳	۵٫۳۹	۳٫۲۰	۲٫۷۶
Eu	۱٫۱۹	۱٫۳۴	۱٫۱۰	۱٫۴۴	۱٫۰۸	۱٫۰۹
Gd	۳٫۶۲	۴٫۸۰	۳٫۵۰	۵٫۵۳	۳٫۲۸	۳٫۴۵
Tb	۰٫۵۹	۰٫۷۷	۰٫۵۴	۰٫۸۹	۰٫۴۹	۰٫۵۸
Dy	۳٫۵۸	۴٫۶۲	۳٫۲۸	۵٫۴۳	۳٫۱۲	۳٫۴۹
Ho	۰٫۷۳	۰٫۹۵	۰٫۷۰	۱٫۱۴	۰٫۶۴	۰٫۷۴
Er	۲٫۲۰	۲٫۸۶	۲	۳٫۱۶	۱٫۸۳	۲٫۱۲
Tm	۰٫۳۲	۰٫۴۳	۰٫۳۱	۰٫۴۸	۰٫۲۹	۰٫۳۱
Yb	۲٫۰۲	۲٫۷۷	۲٫۲۱	۳٫۱۹	۱٫۸۳	۱٫۹۰
Lu	۰٫۳۰	۰٫۴۱	۰٫۳۵	۰٫۵۰	۰٫۳۰	۰٫۲۸
Eu/Eu*	۱٫۰۵	۰٫۹۱	۰٫۹۷	۰٫۸۱	۱٫۰۲	۱٫۰۸
$(La/Yb)_N$	۳٫۸۷	۳٫۷۲	۵٫۱۹	۵٫۸۵	۵٫۵۶	۳٫۰۹
Dy/Yb	۱٫۷۷	۱٫۶۶	۱٫۴۸	۱٫۷۰	۱٫۷۰	۱٫۸۳

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]



شکل۷ الف) موقعیت توده‌های نفوذی منطقه جلمبادان در نمودار نامگذاری [۱۲]، ب) تعیین سری ماگمایی توده‌های نفوذی جلمبـادان براسـاس مقـدار Ce/Yb نـسبت بـه Ta/Yb در نمـودار [۱۳]، پ) موقعیـت تـوده‌هـای نفـوذی در نمـودار [۱۴] در محـدوده متـاآلومین. مـرز جداکننـده گرانیتوئیدهای نوع I از S توسط [۱۵] ارائه شده است که همه نمونه‌ها در محدوده گرانیتوئیدهای نوع I قرار دارند، ت) موقعیت توده‌هـای نفـوذی جلمبادان در نمودار [۱۶]. VAG= گرانیتوئیدهای قوس آتشفشانی، WPG= گرانیتوئیدهای درون صفحه‌ای، ORG= گرانیتوئیـدهای پـشته میـان اقیانوسی، syn-COLG= گرانیتوئیدهای همزمان با برخورد قاره‌ها، ث) نمودار عناصر خاکی نادر بهنجار شـده بـه کنـدریت (اطلاعـات کنـدریت از [۱۸]) هستند، ج) نمودار عناصر فرعی و برخی عناصر خاکی نادر نرمالیزه شده به گوشته اولیه (اطلاعات گوشته اولیه برگرفته از [۲۳]) هستند.



شکل ۸ موقعیت توده‌های نفـوذی جلمبـادان در الـف) نمـودار Th/Yb نـسبت بـه Ta/Yb [۲۴]، TH= تـولئیتی، CA= آهـک-قلیـایی، SHO= شوشونیتی ب) نمودار Dy/Yb نسبت به Dy [۳۱] برای تعیین خاستگاه توده‌ها.

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]

سیالات دگرنهادی ممکن است شامل سیال آبدار یا گدازه‌های بخشی اولیه حاصل از رسوبات و یا پوسته بازالتی فرورانده شده به گوه گوشته‌ای باشد که سبب پایین آوردن منحنی انجماد گوشته، ذوب بخشی و تولید ماگما می‌شود [۲۷، ۲۸]. بنابراین سنگ‌های نفوذی جلمبادان، احتمالاً از ذوب بخشی گوه گوشته‌ای دگرنهاده در اثر سیالات آزاد شده از پوسته اقیانوسی فرورونده تشکیل شده‌اند. این وضعیت مطابق با تشکیل کمان ماگمایی قوچان- سبزوار است که منطقه جلمبادان نیز جزیی از آن است. بنابراین فعالیت ماگمایی آهکی-قلیایی جلمبادان در اثر ذوب گوه گوشته‌ای در نتیجه فرورانش ورقه اقیانوسی نئوتتیس سبزوار به زیر کرانه قاره توران بوده است.

همچنین عمق، ترکیب شیمیایی و درجه ذوب‌بخشی گوشته می‌تواند به‌وسیله عناصر خاکی نادر و نسبتهای آنها (مثلا La/Yb، Sm/Yb یا Dy/Yb) مشخص شود. برای مثال نسبت Dy/Yb در ماگمای مشتق شده از گارنت لرزولیت بیش از ۲٫۵ است، درحالیکه این مقدار برای ماگماهای مشتق شده از اسپینل لرزولیت کمتر از ۲ است [۲۹،۳۰]. مقدار Dy در توده‌های نفوذی جلمبادان بین ۳٫۱۲ تا ۵٫۴۳ گرم در تن و نسبت Dy/Yb بین ۱٫۴۸ تا ۱٫۸۳ متغیر است (جدول ۱). در نمودار Dy/Yb در مقابل Dy [۳۱] ذوب‌بخشی ۷ تا ۱۵ درصد اسپینل لرزولیت باعث تولید ماگمای آهکی-قلیایی منطقه جلمبادان شده است (شکل ۸ ب). این موضوع با الگوی عناصر خاکی نادر، مقدار نسبت $(La/Yb)_N$ و تهی‌شدگی نسبی Eu همخوانی دارد.

مدل احتمالی رخداد کانی‌سازی جلمبادان

کانی‌سازی جلمبادان در یک کمان ماگمایی پهنه فرورانش کرانه قاره تشکیل شده است. توده‌های نفوذی نیمه عمیق آهکی-قلیایی اکسیدان نوع I با ترکیب مونزودیوریت تا دیوریت به شکل استوک و دایک در سنگ‌های آتشفشانی منطقه نفوذ کرده‌اند که منجر به دگرسانی گسترده، تشکیل کانی‌سازی و ناهنجاری‌های زمین‌شیمیایی قابل توجه شده است. دگرسانی‌های سیلیسی- سرسیتی، آرژیلی و پروپلیتی به طور وسیعی در منطقه دیده می‌شوند که شدت آنها در توده‌های نفوذی و در سنگ‌های آتشفشانی نزدیک آنها بیشتر است. نوع دگرسانی در توده‌های مونزودیوریتی تا دیوریتی و سنگ‌های آتشفشانی مجاور بیشتر از نوع آرژیلی و سیلیسی- سرسیتی است. کانی‌سازی پیریت به شکل افشان در توده‌های نیمه عمیق و سنگ‌های آتشفشانی اطراف آنها تا ۱۰ درصد حجم سنگ دیده می‌شود. در پی حضور گسترده پیریت، پهنه گوسان وسیعی نیز تشکیل شده است. ناهنجاری قابل توجه طلا به‌ویژه در بخش شرقی منطقه که عمدتاً بیش از ۰٫۲ گرم در تن بوده و به ۲ گرم در تن نیز می‌رسد، بسیار چشمگیر است. این در حالی است که سیلیتو [۳۲] عیار حد برای کانسارهای مس پورفیری غنی از طلا و فقیر از طلا را مقدار ۰٫۴ گرم در تن طلا معرفی کرده است. مس نیز به بیشینه مقدار ۵۰۹ گرم در تن می‌رسد که با تشکیل مالاکیت‌های محدود منطقه همخوانی دارد. البته باید در نظر داشت که تحرک عنصر مس بیش از طلا بوده و بخش زیادی از مس شستشو شده است و به عیار واقعی آن در بخش‌های عمیق می‌توان پی‌برد. همه شواهد نشان می‌دهد که رخداد کانی‌سازی منطقه جلمبادان احتمالاً می‌تواند یک طلا± مس پورفیری باشد و به‌واسطه نفوذ توده‌های نفوذی نیمه عمیق مونزودیوریتی تا دیوریتی تشکیل شده است. آنچه که مسلم است گسترده بودن واحدهای آتشفشانی و رخنمون کمتر توده‌های نفوذی نیمه عمیق، نوع دگرسانی‌ها و شکل کانی‌سازی نشان می‌دهد که هم اکنون در بخش‌های بالایی کانی‌سازی هستیم و حفاری و بررسی‌های زیرزمینی آتی در این منطقه به طور قطع می‌تواند جنبه‌های روشن‌تری از طلا± مس پورفیری بودن آن را تایید کند و آمار دقیق‌تری از میزان ذخیره و عیار به دست دهد.

برداشت

کمان ماگمایی ترشیاری قوچان- سبزوار با وجود فعالیت ماگمایی آهکی-قلیایی نوع I و حضور کانی‌سازی‌های متعدد

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]

مس و آهن یکی از مناطق مستعد فلززایی ایران است. رخداد کانی‌سازی جلمبادان اولین کانی‌سازی نوع پورفیری غنی از طلا در شمال شرقی ایران و در این کمان ماگمایی است که در این پژوهش معرفی و از جنبه‌های مختلف بررسی شده است. با توجه به اینکه این کمان ماگمایی در یک پهنه فرورانش کرانه قاره تشکیل شده است، حضور چنین ذخایری دور از انتظار نیست. اما متاسفانه با وجود شاخص‌های فراوان مس در این کمربند و همه شرایط مستعد برای تشکیل ذخایر بزرگ پورفیری، تاکنون کمتر به این مسأله توجه شده است. به طور قطع پیگیری پی‌جویی این نوع کانسارها در شمال شرقی ایران و در این کمان ماگمایی، می‌تواند کمربند مهم دیگری از ذخایر پورفیری را در ایران شناسایی کند.

قدردانی

این پروژه در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۳۱۶۴۲/۳ مورخ ۱۳۹۳/۴/۱۴ در پردیس بین‌المللی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شده است. از مدیرعامل و کارکنان محترم شرکت رادین معدن ایرانیان به علت همکاری‌های لازم و در اختیار قرار دادن نتایج زمین‌شیمیایی سپاسگزاریم. همچنین از حمایت مالی سازمان توسعه و نوسازی معدن و صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) و انجام برخی از تجزیه‌ها در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران متشکریم.

مراجع

[1] Alavi M. "*Sedimentary and structural characteristics of the Paleo-Tethys remnants in northeastern Iran*", Geological Society of American Bullitan 103 (1991) 983–992.

[2] Spies O., Lensch G., Mihem A., "*Chemisrty of the post-ophiolithic tertiary volcanic between Sabzevar and Quchan, NE Iran",* in Almassi A. (eds.), Geodynamic project (geotraverse) in Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, (1983) 247-266.

[3] Bauman A., Spies O., Lensch G., "*Strontium isotopic composition of post-ophiolithic tertiary volcanics between Kashmar, Sabzevar and Quchan NE Iran"*, in Almassi A. (eds.), Geodynamic project (geotraverse) in Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, (1983) 267-276.

[4] Karimpur M.H., Malekzadeh Shafaroudi A., Esfandiarpour A., Mohammadnejad H., *"Nyshabour Turquoise mine: The first Cu-Au-U-LREE IOCG type in Iran",* Iranian Journal of Economic Geology 3 (2012) 193-216.

[5] Gholami S., *"Geology, mineralization, geochemistry, and magnetometry of Shotor Sang iron deposit, NE Sabzevar"*, Ms.C thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (2009) 240p.

[6] Zaree A., Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., *"Khanlogh magnetite-apetite deposit, NW Neyshabour: Mineralogy, structure and texture, alteration, and determination of model",* Iranaian Journal of Crystallography and Mineralogy 1 (24) (2016) 131-144.

[7] Zarei A., Malekzadeh Shafaroudi A., Karimpour M.H., "*Geochemistry and genesis of iron-apatite ore in Khanlogh deposit, Eastern Cenozoic Quchan-Sabzevar magmatic arc, NE Iran*", Acta Geologica Sinica (English Edition) 90 (1) (2016) 121-137.

[8] Fatehi H., *"Geology, mineralization, and geochemistry of Jalambadan prospect area, NW Sabzevar"*, Ms.C thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad (2013) 240p.

[9] Iranian Radin Maadan Company *"Final report of exploration activity in Jalambadan area",* (2014) 469p.

[10] Behroudi A., Omrani J., *"Bashtin geological map 1:100000 scale",* Geological Survey of Iran (1999).

[11] Whitney D. L., Evans B. W., "*Abbreviations for names of rock-forming minerals*", American Mineralogist 95 (2010) 185–187.

[12] Middlemost E.A.K., "*Magmas and magmatic rocks*", Longman Publication Company, London (1985).

[13] Siddiqui R.H., Asif Khan M., Qasim Jan, M., "*Geochemistry and petrogenesis of the Miocene alkaline and sub-alkaline volcanic rocks from the*

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]

[24] Pearce J.A., "*Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust*", Lithos 100 (2008) 14–48.

[25] Aldanmaz E., Pearce J.A., Thirlwall M.F., Mitchell J.G., "*Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey*", Journal of Volcanology and Geothermal Research 102 (2000) 67–95.

[26] Helvacı C., Ersoy E.Y., Sözbilir H., Erkül F., Sümer Ö., Uzel B., "*Geochemistry and $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of Miocene volcanic rocks from the Karaburun Peninsula: Implications for amphibole-bearing lithospheric mantle source, Western Anatolia*", Journal of Volcanology and Geothermal Research 185 (2009) 181–202.

[27] Harangi S., Downes H., Thirlwall M., Gmeling K., "*Geochemistry, Petrogenesis and Geodynamic Relationships of Miocene Calc-alkalineVolcanic Rocks in the Western Carpathian Arc, Eastern Central Europe*", Journal of Petrology 48(12) (2007) 2261–2287.

[28] Holang, N., Itoh J., Miyagi I., "*Subduction components in Pleistocene to recent Kurile arc magmas in NE Hokkaido, Japan*", Journal of Volcanology and Geothermal Research 200 (2011) 255–266.

[29] Duggen S., Hoernle K., Van Den Bogaard P., Garbe-Schönberg D., "*Post-collisional transition from subduction- to intraplate-type magmatism in the westernmost Mediterranean: evidence for continental-edge delamination of subcontinental lithosphere*", Journal of Petrology 46 (2005) 1155–1201.

[30] Jiang Y.H., Jiang S.Y., Dai B.Z., Liao S.Y., Zhao K.D., Ling H.F., "*Middle to late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan province, southeast China: implications for a continental arc to rifting*", Lithos 107 (2009) 185–204.

[31] Arslan M., Temizel T., Abdioglu E., Kolayli H., Yucel C., Boztu D., Sen C., "*^{40}Ar–^{39}Ar dating, whole-rock and Sr–Nd–Pb isotope geochemistry of postcollisional Eocene volcanic rocks in the Chagai arc, Baluchistan, Pakistan:Implications for porphyry Cu-Mo-Au deposits*", Journal of Himalayan Earth Sciences 40 (2007) 1-23.

[14] Maniar P.D., Piccoli P.M., "*Tectonic discrimination of granitoids*", Geological Society of America Bulletin 101 (1989) 635-643.

[15] Chappell B.W., White A.J.R., "*Two contrasting granite types, 25 years later*", Australian Journal of Earth Sciences 48 (2001) 489–500.

[16] Pearce J.A., Harris N.W., Tindle A.G., "*Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks*", Journal of Petrology 25 (1984) 956-983.

[17] Rollinson H., "*Using geochemical data, Evaluation, Presentation, Interpretation*", Harlow, UK, Longman (1993) 352 p.

[18] Boynton W. V., "*Cosmochemistry of the rare earth elements, Meteorite studies*", in Rare Earth Element Geochemistry (P. Henderson, ed.), (Developments in Geochemistry 2), Elsevier, Amesterdam (1985) 115-1522.

[19] Gill J. B., "*Orogenic Andesites and Plate Tectonics*", Springer, New York (1981).

[20] Wilson M., "*Igneous Petrogenesis*", Uniwin Hyman, London (1989).

[21] Pearce J. A., "*Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins*", In: Hawkesworth, C.J., Norry, M.J. (Eds.), Continental Basalts and Mantle Xenoliths, Shiva, Nantwich (1983) 230-249.

[22] Geng H., Sun M., Yuan C., Xiao W.J., Xian W.S., Zhao G.C., Zhang L.F., Wong K., Wu F.Y., "*Geochemical, Sr–Nd and zircon U–Pb–Hf isotopic studies of Late Carboniferous magmatism in the West Junggar, Xinjiang: implications for ridge subduction*", Chemical Geology 266 (2009) 364–389.

[23] Sun S. S., McDonough W. F., "*Chemical and isotopy systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes*", In: Magmatism in the Ocean: Basins. The Geological Society of London, special publication 42 (1989).

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]

[32] Sillitoe R.H., *"Gold-rich porphyry deposits: descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery",* Reviews in Economic Geology 13 (2000) 315-345.

southern part of the Eastern Pontides (NE Turkey): implications for magma evolution in extension-induced origin", Contributions to Mineralogy and Petrology 166 (2013) 113–142.

[DOI: 10.29252/ijcm.26.1.31]